

УДК 53.096:539.1.078

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КОНВЕРТОРА НА ОТКЛИК СПЕКТРОМЕТРА

В. А. Басков^{1,*}, В. В. Ким¹, Б. И. Лучков²,
В. Ю. Тугаенко², В. А. Хабло¹

Охлаждение до температуры 77 К 1 мм ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристаллического вольфрамового конвертора перед электромагнитным спектрометром толщиной $25X_0$ и регистрирующего ливни от электронов 28 ГэВ приводит к уменьшению радиационной длины кристалла на $\sim 30\%$, сдвиге каскадной кривой развития ливня в спектрометре на $\sim 7\%$ и улучшает энергетическое разрешение спектрометра на $\sim 5\%$ по сравнению с аналогичными параметрами спектрометра при температуре кристалла 293 К.

Ключевые слова: ориентированный кристалл, аномальные электромагнитные ливни, отклик спектрометра, температура, каскадные кривые, радиационная длина, ориентационная зависимость.

Отклик спектрометра, регистрирующего электромагнитные ливни от электронов (позитронов) и γ -квантов с энергией $E \geq 0.1$ ГэВ (“стандартные” ливни), определяется интегральной и каскадной кривыми развития ливня, которые, в свою очередь, определяют основные свойства спектрометра (продольный и поперечный размеры, энергетическое разрешение). На отклик спектрометра, регистрирующего “стандартные” ливни, влияют в основном два фактора: энергия частицы и свойства рабочего вещества спектрометра [1, 2].

Отклик спектрометра, регистрирующего электромагнитные ливни, развивающиеся в ориентированном кристалле (“аномальные” ливни), отличается от отклика спектрометра, регистрирующего “стандартные” ливни [3]. В этом случае на отклик спектромет-

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский проспект, 53.

² 115549, Москва, Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”.

* E-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

ра дополнительно влияют: тип кристалла (потенциал оси или плоскости, вдоль которой развивается ливень), степень ориентации относительно оси или плоскости, температура кристалла [3, 4].

Теоретические работы, связанные с изучением электродинамических процессов излучения электронов (позитронов) и рождения e^+e^- -пар γ -квантами высоких энергий при углах входа в кристаллы $\Theta \ll V/mc^2$ предсказали зависимость процессов от температуры [3] (V – масштаб потенциала оси (плоскости) кристалла). Экспериментальные работы, выполненные в ФИАНе, подтвердили, что вероятность рождения e^+e^- -пар γ -квантами со средней энергией $\langle E_\gamma \rangle = 18$ ГэВ и выход излучения электронами с энергией $E = 28$ ГэВ в области постоянного сильного поля (ПСП) при охлаждении ориентированного 1 мм кристалла вольфрама с температуры $T_1 = 293$ К до $T_2 = 77$ К возрастают на $\sim 15\%$ [5]. Тем не менее, поведение “аномальных” ливней в ориентированном кристалле и степень изменения отклика спектрометра, регистрирующего ливни, при изменении температуры кристалла оставалось неясным.

Данная работа представляет экспериментальные результаты исследований “аномальных” ливней и зависимости отклика электромагнитного спектрометра с конвертором из ориентированного кристаллического вольфрамового конвертора от температуры конвертора.

Работа была выполнена на электронном канале ускорителя ИФВЭ на установке “Каскад” [4, 6]. В качестве конвертора использовался кристалл вольфрама толщиной 1 мм, ориентируемый вдоль оси $\langle 111 \rangle$ (радиационная длина вольфрама $X_0 = 3.5$ мм). Кристалл считался ориентированным при $\Theta_o = 0$ и разориентированным (аморфным) при $\Theta_p \geq 20$ мрад. Мозаичность кристалла составляла 1 мрад. Для регистрации ливней использовался спектрометр, состоящий из составного черенковского ливневого спектрометра (СЧЛС) (10 независимых радиаторов толщиной $1X_0$) и черенковского спектрометра (ЧС) (толщиной $15X_0$). Исследовались характеристики ливней, выходящих из ориентированного кристалла, и отклик спектрометра, регистрирующего эти ливни, при комнатной температуре кристалла $T_1 = 293$ К и при температуре жидкого азота $T_2 = 77$ К.

На рис. 1 представлены каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов при разных температурах разориентированного (зависимости 1, 2) и ориентированного (зависимости 3, 4) кристаллического конвертора перед СЧЛС (K – калибровочная кривая, полученная при отсутствии перед СЧЛС кристаллического конвертора). Разориентированный конвертор при T_1 перед СЧЛС сдвигает каскад-

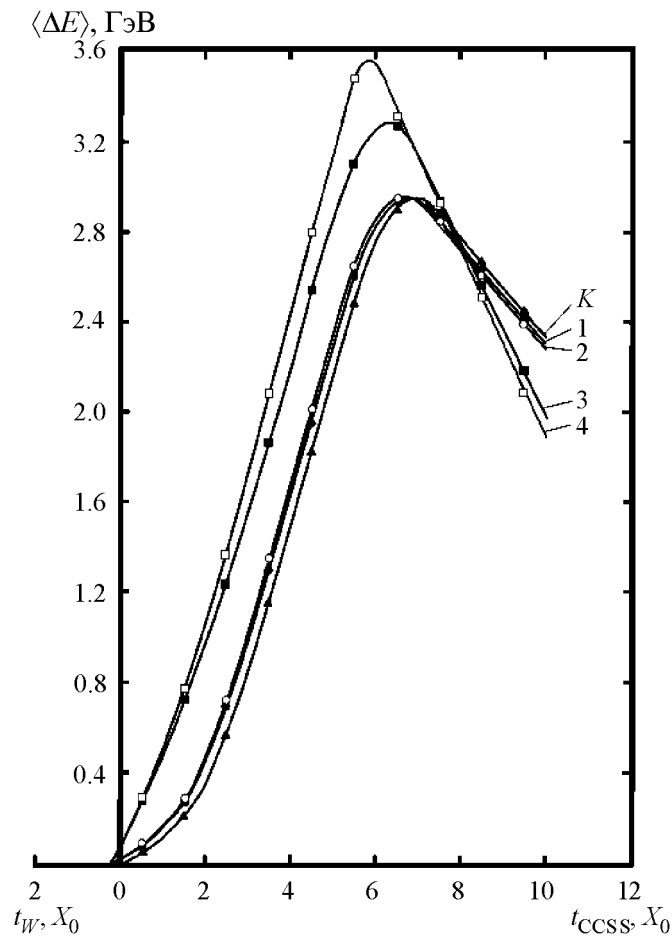


Рис. 1: Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией $E = 28$ ГэВ при разных температурах разориентированного (1, 2 – $\Theta_p = 20$ мрад) и ориентированного (3, 4 – $\Theta_o = 0$ мрад) вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристаллического 1 мм вольфрамового конвертора ($\langle \Delta E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в счетчиках СЧЛС; K – кристалл перед СЧЛС отсутствует; t_W и t_{rmCCSS} – толщины кристалла и СЧЛС в единицах X_0 , соответственно; 1, 3 – $T_1 = 293$ К; 2, 4 – $T_2 = 77$ К).

ную кривую развития электромагнитного ливня в сторону её начала, в кристалл, на величину толщины кристалла (зависимость 1). Ориентация кристалла при T_1 сдвигает каскадную кривую ещё больше в сторону начала развития ливня (зависимость 3) [4]. Охлаждение разориентированного конвертора до T_2 сдвигает каскадную кривую на $\approx 0.1X_0$ ($\approx 1.5\%$) в сторону начала развития ливня (зависимость 2). Ориентация охлажденного кристалла сдвигает каскадную кривую (зависимость 4) к началу развития на

$\sim 15\%$ относительно зависимости 2 (разориентированный кристалл) или на $\sim 7\%$ относительно каскадной кривой при ориентированном кристалле и T_1 (зависимость 3).

Т а б л и ц а 1

Положение максимума каскадной кривой развития ливня от электронов с $E = 28$ ГэВ в СЧЛС при разориентированном и ориентированном конверторе перед СЧЛС в зависимости от температуры конвертора

Положение максимума каскадной кривой в СЧЛС Температура	$t_{\max p}, X_0$ ($\Theta_p = 20$ мрад)	$t_{\max o}, X_0$ ($\Theta_o = 0$ мрад)	$\Delta t = t_{\max p} - t_{\max o}, X_0$
$T_1 = 293$ К (калибровка)	7.1 ± 0.1		
$T_1 = 293$ К	6.8 ± 0.1	6.3 ± 0.1	0.5 ± 0.2
$T_2 = 77$ К	6.7 ± 0.1	5.9 ± 0.1	0.8 ± 0.2

В таблице 1 представлены положения максимума каскадной кривой и величина сдвижки кривой при ориентации и разориентации кристалла при разных температурах. Величина $\Delta t = t_{\max p} - t_{\max o}$, определяющая разность положений максимума каскадной кривой в СЧЛС при ориентированном конверторе ($t_{\max p}$) относительно разориентированного ($t_{\max o}$), является также и величиной, на которую увеличивается эффективная толщина конвертора $t_{W \text{ eff}} = t_W + \Delta t$ ($t_{W \text{ eff}}$ – толщина конвертора, при которой происходит наиболее эффективное взаимодействие частиц с кристаллом; t_W – толщина конвертора при разориентации кристалла).

Увеличение эффективной толщины конвертора $t_{W \text{ eff}}$ означает уменьшение радиационной длины ориентированного кристалла $X'_0 = X_0 \cdot (t_W / t_{W \text{ eff}})$ [3–5]. Рис. 2 представляет зависимость радиационной длины кристалла от температуры. Видно, что охлаждение ориентированного конвертора с T_1 до T_2 приводит к уменьшению радиационной длины на $\approx 30\%$. Охлаждение разориентированного конвертора с T_1 до T_2 (зависимость 2 на рис. 1), приводит, как указано выше, к незначительной, на $\approx 1.5\%$, сдвижке каскадной кривой и показывает, что при данном угле входа частиц в кристалл (зависимость 1 на рис. 2) изменилась радиационная длина конвертора. Изменение радиационной длины в этом случае говорит о том, что при температуре T_2 кристалл уже не является разориентированным, то есть указывает на увеличение ширины ориентационной зависимости развития ливня в кристалле.

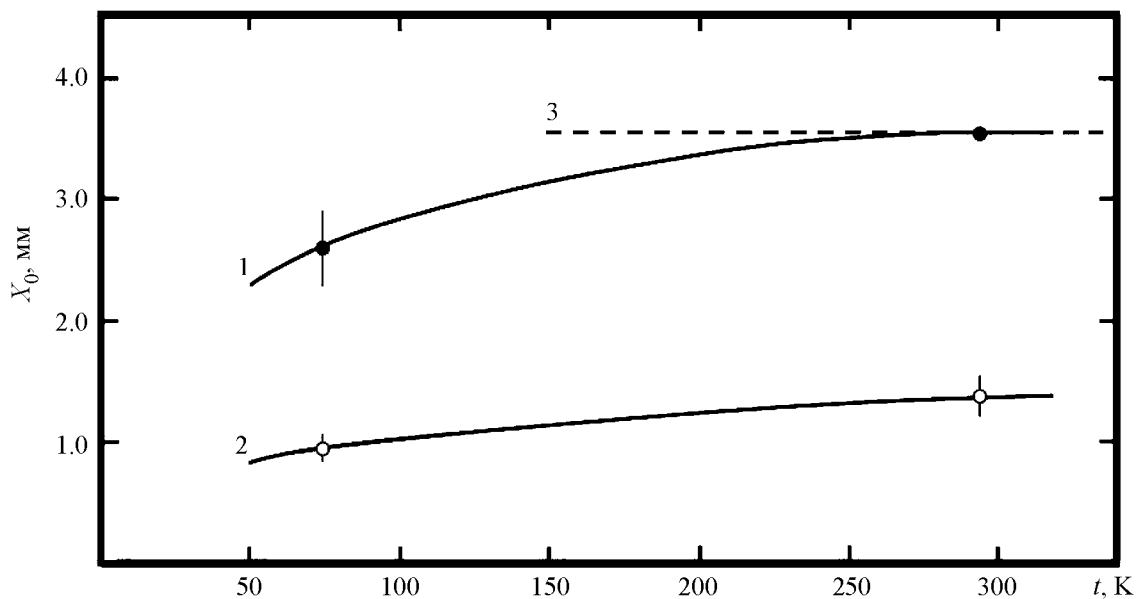


Рис. 2: Зависимость радиационной длины: 1 – разориентированного ($\Theta_p = 20$ мрад) и 2 – ориентированного ($\Theta_o = 0$ мрад) вдоль оси $\langle 111 \rangle$ кристаллического 1 мм вольфрамового конвертора перед СЧЛС от температуры при энергии электронов $E = 28$ ГэВ (3 – аморфный вольфрам).

Действительно, результаты измерений зависимости среднего энерговыделения ливня в первом счетчике СЧЛС для T_1 и T_2 от угла ориентации конвертора Θ [6] показывают, что охлаждение конвертора до T_2 увеличивает ширину ориентационной зависимости на $\Delta\Theta \approx 1$ мрад (под шириной ориентационной зависимости $\Delta\Theta$ принимается полная ширина ориентационной зависимости измеряемого параметра ливня (например, энерговыделения) на половине высоты).

Охлаждение конвертора с T_1 до T_2 улучшает энергетическое разрешение спектрометра. На рис. 3 представлены зависимости относительного энергетического разрешения спектрометра СЧЛС+ЧС общей толщиной $25X_0$ с разориентированным (зависимость 1) и ориентированным конвертором (зависимости 2 и 3) ($\delta = \sigma/\langle E \rangle$, σ – среднеквадратичное разрешение, $\langle E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в спектрометре) от энергии электронов $E = 26$ и 28 ГэВ и температуры. Точки ●, ○ и △ были измерены, для точек □ были сделаны оценки. Оценки были произведены следующим образом: разрешение спектрометра СЧЛС+ЧС при разориентированном кристалле определяется как $\sigma/\langle E \rangle = \alpha + k/E^{-1/2} = 0.012 + 0.061/E^{-1/2}$ [4, 7]. Если предположить, что при ориентации кристалла постоянный член α , определяющий систематические ошибки измерений

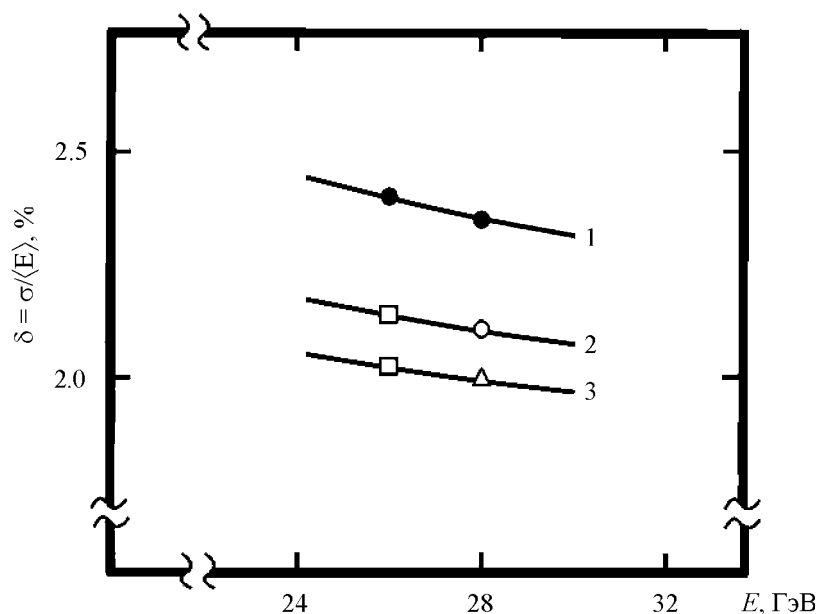


Рис. 3: Зависимость относительного энергетического разрешения спектрометров СЧЛС+ЧС общей толщиной $25X_0$ ($\delta = \sigma/\langle E \rangle$, σ – среднеквадратичное разрешение, $\langle E \rangle$ – средняя энергия ливня, выделившаяся в спектрометре) с разориентированным (1) и ориентированным вдоль оси $\langle 111 \rangle$ (2 и 3) кристаллическим вольфрамовым конвертором 1 мм от энергии электронов: 1 и 2 – $T_1 = 293$ К; 3 – $T_2 = 77$ К (\bullet , \circ , \triangle – измерения; \square – оценка).

спектрометра, не меняется, то коэффициент k при $E = 28$ ГэВ и T_1 для зависимости 2 (кристалл ориентирован), с учетом измеренного разрешения $\sigma/\langle E \rangle = 2.11\%$, стал равным $k = 0.048$, а для T_2 и этой же энергии при измеренном разрешении $\sigma/\langle E \rangle = 2.00\%$ стал равным $k = 0.042$ (улучшение разрешения при уменьшении температуры составило $\sim 5\%$). Отсюда относительное энергетическое разрешение при $E = 26$ ГэВ для T_1 и T_2 составило $\delta \approx 2.14\%$ и 2.02% соответственно.

Таким образом, температура ориентированного кристалла влияет на развитие электромагнитных ливней. Уменьшение температуры ориентированного кристалла приводит к усилению эффектов развития электромагнитных ливней в кристалле (увеличению энерговыделения, уменьшению радиационной длины кристалла, увеличению ширины ориентационной зависимости развития ливня) и к изменению отклика спектрометра, регистрирующего электромагнитные ливни, выходящие из кристалла (уменьшению длины продольного развития ливня, улучшению энергетического разрешения). Уменьшение температуры ориентированного кристалла на значительную величину (с

комнатной 293 К до температуры жидкого азота 77 К, то есть на ~ 200 К ($\sim 70\%$) ведет к изменению эффектов развития ливней в зависимости от параметров кристалла на 6% – 30%. Данные измерения подтверждают ранние измерения зависимости электродинамических процессов от температуры [5] и предсказания работы [3] по усилению ориентационных эффектов с уменьшением температуры.

Авторы выражают благодарность Е. И. Тамму и Е. И. Малиновскому за поддержку работы; В. И. Сергиенко за практическое руководство и организацию работ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Б. Словинский, Физика элементарных частиц и атомного ядра (ФЭЧАЯ), **25**, вып. 2, 417 (1994), Дубна.
- [2] А. Н. Калиновский, Н. В. Мохов, Ю. П. Никитин, *Прохождение частиц высоких энергий через вещество* (М., Энергоатомиздат, 1985).
- [3] U. I. Uggerhoj, *Reviews of Modern Physics* **77**, 1131 (2005).
- [4] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Препринт ФИАН № 31 (Москва, ФИАН, 2006).
- [5] В. А. Басков, В. Б. Ганенко, Ю. В. Жебровский и др., Тезисы докладов XIX Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (М., МГУ, 84, 1989).
- [6] В. А. Басков, В. В. Ким, Б. И. Лучков и др., Препринт ФИАН № 35 (Москва, ФИАН, 2011).
- [7] В. А. Басков, А. С. Белоусов, В. В. Ким и др., ПТЭ, № 5, 66 (2011).

Поступила в редакцию 8 ноября 2011 г.